



Nowe propozycje dotyczące diagnostyki gleb TUZ i wykorzystania jej wyników.

**Cz. 2: Internet rzeczy, czujniki glebowe i sztuczna inteligencja w diagnozowaniu stanu agrochemicznego
i jakościowego gleb uprawnych**

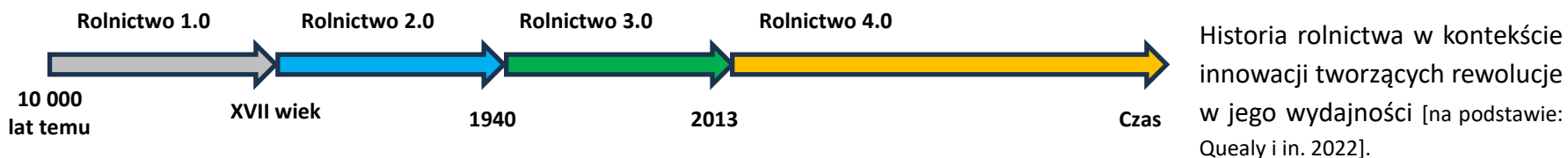
prof. dr hab. inż. Stefan Pietrzak

Współpraca: mgr inż. Zuzanna Frankiewicz

Szkolenie w formie online dla pracowników stacji chemiczno-rolniczych, doradców rolnych i rolników nt. „Racjonalne nawożenie trwałych użytków zielonych” w ramach Zadania 2 „Racjonalne nawożenie” realizowanego na podstawie umowy dotacyjnej nr DIW.ib.070.3.2025 zawartej między Ministerstwem Rolnictwa i Rozwoju Wsi a Instytutem Technologiczno-Przyrodniczym – Państwowym Instytutem Badawczym.
Falenty, 16.09.2025 r.

Wprowadzenie

- ❖ Powszechnie przyjmuje się, że zapoczątkowana została czwarta rewolucja w rolnictwie (jako jej początek wymieniany jest rok 2013) określana mianem Rolnictwa 4.0, której celem jest zastosowanie najnowszych osiągnięć w dziedzinie technologii informatycznych w produkcji rolnej, aby uczynić rolnictwo bardziej zorganizowanym, przewidywalnym i wydajnym.



- ❖ Rolnictwo 4.0 strategicznie ukierunkowane jest na sprostanie wyzwaniom, takim jak zmiany klimatu, bezpieczeństwo żywnościowe i ochrona zasobów. Ma ono potencjał do zwiększenia wydajności, rentowności i zrównoważonego rozwoju w rolnictwie.
- ❖ Zdalne monitorowanie podstawowych parametrów gleby w celu zapewnienia właściwego i zrównoważonego zarządzania nią jest jednym z elementów Rolnictwa 4.0.
- ❖ W ramach Rolnictwa 4.0, w zakresie dotyczącym agrochemicznej diagnostyki gleb użytków rolnych, w tym użytków zielonych, aktualnie najważniejsze trendy światowe wyznaczają rozwiązania oparte na wykorzystaniu Internetu Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT) w konfiguracji z glebowymi czujnikami pomiarowymi oraz sztuczną inteligencją (ang. artificial intelligence - AI) i uczeniem maszynowym (ang. machine learning – ML).

Wprowadzenie cd.

- ❖ Termin „Internet Rzeczy” został wprowadzony w 1999 roku przez Kevina Ashtona (ur. 1968 r. w Birmingham, Anglia) - brytyjskiego inżyniera i wynalazcę, w prezentacji biznesowej pt. „The Internet of Things”, opisującej system, w którym internet jest połączony z różnego rodzaju obiektami fizycznymi za pomocą wbudowanych w nie czujników.
- ❖ Pojęcie „Internet Rzeczy” nie jest definiowane w jednolity sposób. W tym zakresie spotkać można wiele różnych opisów objaśniających jego koncepcję, aczkolwiek są one bliskie sobie. W uproszczeniu przyjąć można, że termin „Internet Rzeczy” oznacza sieć różnego rodzaju urządzeń i maszyn - „rzeczy”, które mogą automatycznie komunikować się i wymieniać dane za pośrednictwem sieci przez internet bez ingerencji człowieka. „Rzecz”, w kontekście Internetu Rzeczy, odnosi się do dowolnego obiektu fizycznego (np. pojazdy, maszyny rolnicze, zwierzęta gospodarskie, przyrządy medyczne, urządzenia domowe i przedmioty codziennego użytku), wyposażonego w komponenty elektroniczne, takie jak czujniki i oprogramowanie. Systemy IoT działają poprzez zbieranie danych z czujników osadzonych w urządzeniach IoT, które są następnie przesyłane przez bramę IoT do ośrodka ich przechowywania i analizowania (np. chmura obliczeniowa) lub/i bezpośrednio do odbiorników jakimi są komputery, smartfony i tablety.



Kevin Ashton. Źródło: Wikipedia. Autor fotografii: Larry D. Moore - licencja_CC BY 4.0; https://en.wikipedia.org/wiki/Kevin_Ashton#/media/File:Kevin_Ashton_2015.jpg

Wprowadzenie cd.

❖ W ciągu ostatnich kilku lat Internet Rzeczy stał się jedną z najważniejszych technologii XXI wieku. IoT aktualnie jest systemem, który rozwija się coraz bardziej dynamicznie w wielu dziedzinach gospodarki, w tym w rolnictwie. Jego wartość rynkową w tym sektorze wyceniono w 2021 r. na 12,5 mld USD natomiast w 2024 r. już na ok. 16,5 mld USD. Przewiduje się, że w 2030 r. wartość rynku IoT w odniesieniu do rolnictwa osiągnie poziom ok. 28,6 mld USD [Duguma, Bai 2025].



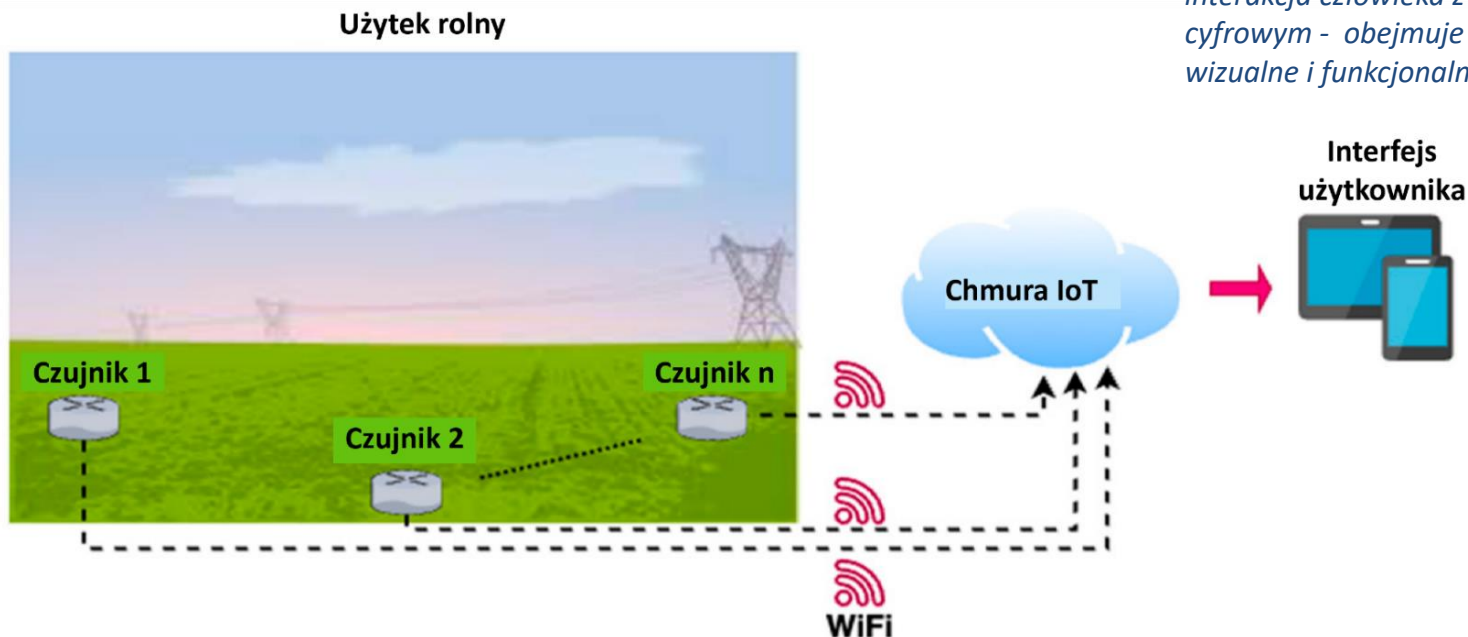
Wartość rynku IoT w sektorze rolnictwa w perspektywie do 2030 r. [Duguma, Bai 2025 - licencja Creative Commons Attribution 4.0 International License; <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Wprowadzenie cd.

❖ W ramach działalności rolniczej Internet Rzeczy w coraz większym stopniu jest wykorzystywany w świecie do diagnozowania stanu agrochemicznego i jakościowego gleb uprawnych. Architektura systemu diagnostyki gleb (inteligentnego monitorowania gleby) oparta na IoT zawiera trzy główne człony:

- człon pomiarowy (czujniki),
- człon komunikacyjny,
- człon inteligentnego przetwarzania danych.

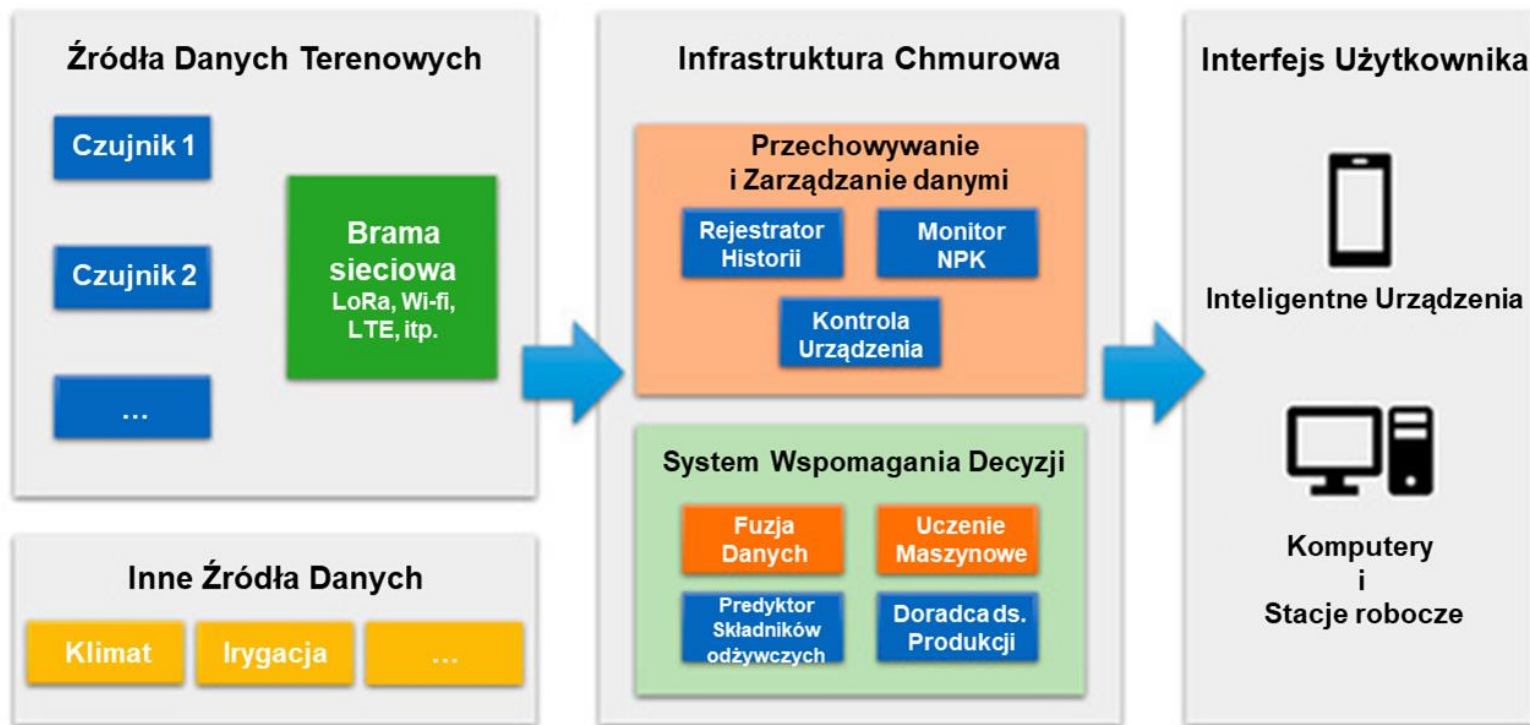
➤ *Interfejs użytkownika to przestrzeń, w której następuje interakcja człowieka z maszynami cyfrowym - obejmuje elementy wizualne i funkcjonalne.*



Konfiguracja systemu diagnostyki gleb opartego na IoT [Sabu i in. 2023 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Wprowadzenie cd.

- ❖ Człon inteligentnego przetwarzania danych w IoT poza danymi uzyskiwanymi za pomocą czujników, gromadzi i analizuje m.in. dane meteorologiczne i historyczne dane dotyczące gleby. Na ich bazie może generować informacje umożliwiające lepsze zrozumienie właściwości gleby oraz tworzyć prognozy ich zmian. Wiedza w tym zakresie może następnie zostać wykorzystana do opracowania długoterminowych planów zarządzania glebą, które priorytetowo traktują zdrowotność gleby, obieg składników odżywczych i oszczędność wody.



Literatura: Liu J., Cai H., Chen, S. P. J., Zhao L. 2023. A Review on Soil Nitrogen Sensing Technologies: Challenges, Progress and Perspectives. Agriculture 2023, 13, 743. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040743>

Wprowadzenie cd.

- ❖ Czujniki odgrywają kluczową rolę w ekosystemie IoT jako jego „oczy” i „uszy”. Monitorują one parametry gleby, a następnie, poprzez połączenia bezprzewodowe – bramy, dane przez nie zebrane są przesyłane do pamięci masowej w chmurze. Po przetworzeniu i analizie w niej dane wyjściowe są przesyłane do interfejsu użytkownika. Jest to zazwyczaj mobilna lub webowa aplikacja, która pomaga w interakcji z systemem.
 - Brama Internetu Rzeczy (np. Wi-Fi, Bluetooth) to fizyczne urządzenie lub oprogramowanie, które stanowi węzeł łączący urządzenia i czujniki IoT z systemem przetwarzaniem danych w chmurze. Nowoczesne bramy IoT często umożliwiają dwukierunkowy przepływ danych pomiędzy chmurą a urządzeniami IoT.
 - Chmura obliczeniowa inaczej przetwarzanie w chmurze (ang. cloud computing) to usługa świadczona przez internet, która zapewnia dostęp do pamięci masowej, serwerów, baz danych, sieci, oprogramowania, analiz, aplikacji i innych zasobów na żądanie. Nazwa „chmura” ma prozaiczną genezę wynikającą z tego, że pierwsi projektanci sieci na roboczo zobrazowali koncepcję połączenia wielu urządzeń, wykorzystując rysunek przypominający chmurkę.
- ❖ W procesie przetwarzania danych w chmurze wykorzystuje się sztuczną inteligencję. Sztuczna inteligencja umożliwia przetwarzanie i analizę w czasie rzeczywistym wielkich strumieni danych generowanych przez urządzenia IoT i w następstwie tego procesu dostarcza rolnikom dane prognostyczne w zakresie stanu gleby, w celu skuteczniejszego nią zarządzania.

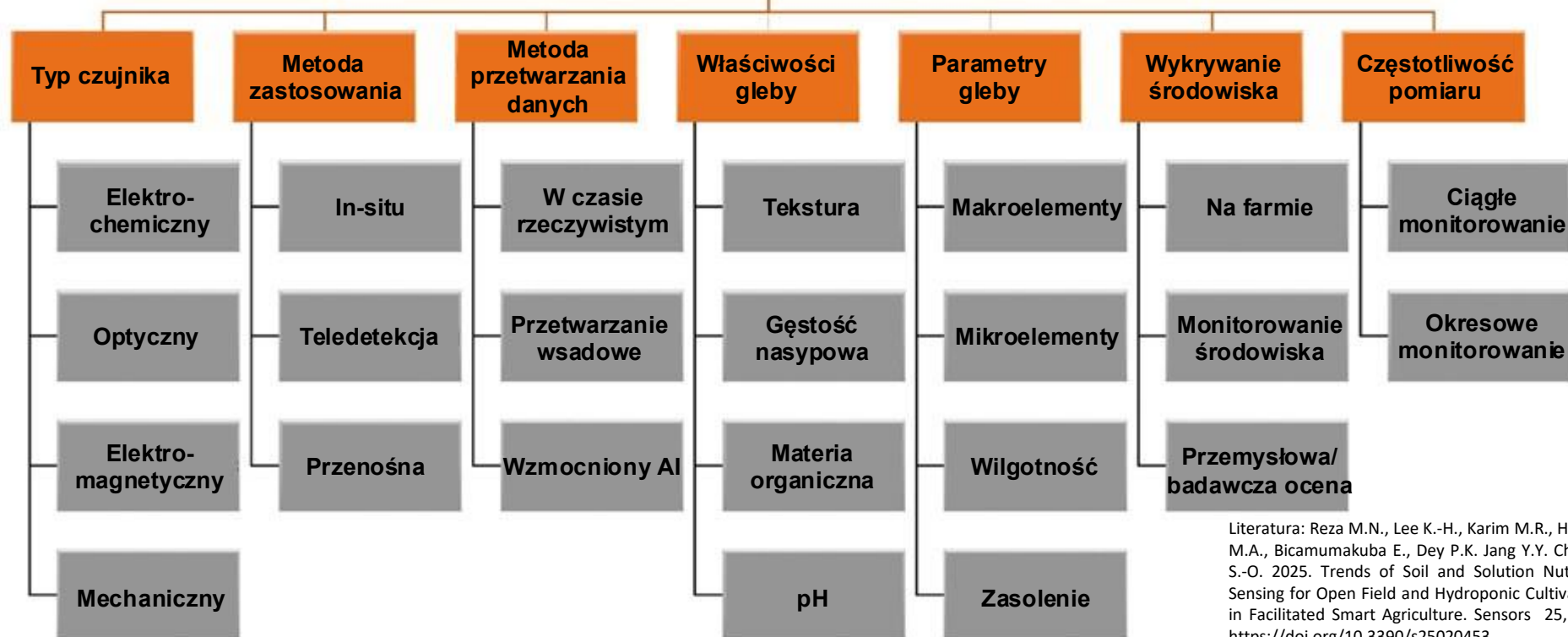
Czujniki glebowe IoT

- ❖ Czujniki glebowe IoT stanowią podstawowy komponent rolniczego Internetu Rzeczy, który umożliwia gromadzenie i przesyłanie docelowo do użytkownika aktualnych danych dotyczących właściwości gleby. Zasada działania czujników gleby polega na przekształcaniu parametrów fizycznych lub chemicznych gleby na sygnały cyfrowe, przesyłaniu ich do punktu końcowego kontroli w celu analizy i przetwarzania oraz ułatwianiu zarządzania stanem gleby.
- ❖ Nowoczesne czujniki glebowe wyposażone w funkcje IoT mogą przysyłać dane w czasie rzeczywistym bezpośrednio do smartfonów lub komputerów rolników. Łączność ta pozwala na ciągłe monitorowanie warunków glebowych, obejmujących takie parametry jak zawartość składników odżywczych, pH wilgotność i temperatura. Dane w czasie rzeczywistym pomagają rolnikom w podejmowaniu natychmiastowych decyzji dotyczących nawadniania i nawożenia, prowadząc do bardziej wydajnego zarządzania gospodarstwem i zmniejszenia marnotrawstwa zasobów.
- ❖ W stosunku do czujników glebowych IoT stawia się wymagania, aby dostarczały aktualnych i precyzyjnych danych, a ponadto aby posiadały takie cechy, jak niski koszt, wysoka niezawodność i wysoki stopień automatyzacji (co jest istotne z punktu widzenia upowszechnienia ich stosowania) [Liu i in. 2023].

Rodzaje czujników glebowych stosowanych w inteligentnym rolnictwie

- ❖ Istnieje wiele rodzajów czujników glebowych, które umożliwiają wdrożenie inteligentnego rolnictwa. Klasyfikuje się je w oparciu o różne kryteria, m.in. takie, jak: rodzaj zastosowanej techniki pomiarowej, metody gromadzenia danych, środowiska aplikacji lub częstotliwości pomiarów.

Wykrywanie Składników Odżywczych w Glebie

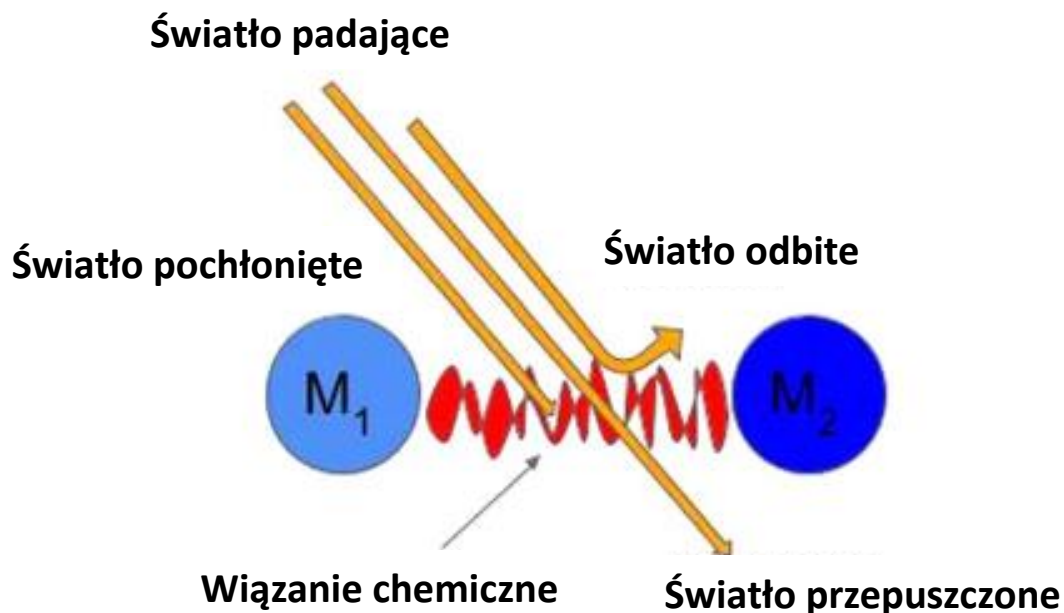


Literatura: Reza M.N., Lee K.-H., Karim M.R., Haque M.A., Bicamumakuba E., Dey P.K. Jang Y.Y. Chung, S.-O. 2025. Trends of Soil and Solution Nutrient Sensing for Open Field and Hydroponic Cultivation in Facilitated Smart Agriculture. Sensors 25, 453. <https://doi.org/10.3390/s25020453>

Klasyfikacja czujników do wykrywania składników odżywczych w glebie w celu zarządzania nimi [Reza i in. 2025 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Czujniki optyczne IoT

- ❖ Spośród wszystkich dostępnych rodzajów czujników do wykrywania składników odżywczych w glebie w większości przypadków stosowane są czujniki funkcjonujące w oparciu o optyczne i elektrochemiczne techniki pomiarowe [Burton i in. 2020; Pal i in. 2024.].
- ❖ Czujniki optyczne wykorzystują spektroskopię opartą na spektroskopii odbiciowej w celu określenia wielkości energii odbitej i pochłoniętej przez jony składników odżywczych w glebie i są najczęściej stosowane do wykrywania trzech głównych makroskładników – N, P i K, w glebie.



Zobrazowanie spektroskopii w podczerwieni. Spektrofotometr rejestruje odbicie promieniowania, tworząc widmo odbicia, które określa wielkość przechwyconej energii w funkcji długości fali. Pozwala to zidentyfikować cząsteczkę, poprzez porównanie jej piku absorpcji z bazą danych widm [Burton i in. 2020 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Literatura:

- Burton L., Jayachandran K., Bhansali S.. 2020. Review—The “Real-Time” Revolution for In situ Soil Nutrient Sensing. J. Electrochem. Soc. 167, 3, 037569. DOI:<https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab6f5d>
- Pal A., Dubey S.K., Goel S., Kalita P.K. 2024. Portable sensors in precision agriculture: Assessing advances and challenges in soil nutrient determination. TrAC - Trends in Analytical Chemistry, 180, Article 117981. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117981>

Czujniki elektrochemiczne IoT

- ❖ Czujniki elektrochemiczne do oznaczania składników odżywczych w glebie działają przy użyciu elektrod jonoselektywnych (elektrody, których potencjał względem elektrody odniesienia, zmienia się pod wpływem zmian aktywności jonów w badanym roztworze) w celu zainicjowania prądu lub napięcia wyjściowego, które odzwierciedla stężenie docelowych jonów.
- ❖ Elektrochemiczne czujniki gleby są szeroko stosowane do pomiaru składników odżywczych w glebie ze względu na ich szybkość reakcji, opłacalność i wysoką czułość w porównaniu z innymi metodami.



Elektrody czujnika NPK (a) i czujnik zainstalowany w glebie (b) [Bulacio Fischer i in. 2025]
Rysunek zawarty w cytowanej pracy wykorzystano na podstawie licencji Creative Commons (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Literatura: Bulacio Fiscqer P.T., Carella A.,Massenti, R., Fadhilah R., Lo Bianco, R. 2025. Advances in Monitoring Crop and Soil Nutrient Status: Proximal and Remote Sensing Techniques. Horticulturae, 11, 182. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020182>

Bezprzewodowe sieci czujników

- ❖ Rozwój Internetu Rzeczy oraz jego oprogramowania i sprzętu doprowadził do powstania zupełnie nowej platformy, zwanej Internetem Rzeczy Podziemnych (IoUT) lub Bezprzewodowych Sieci Czujników Podziemnych (WUSN) [Wohwe Sambo, Förster 2023].
- ❖ Bezprzewodowe Sieci Czujników Podziemnych (WUSN), składają się z szeregu węzłów czujnikowych umieszczonych pod powierzchnią gruntu. Tworzą one systemy, które potencjalnie umożliwią szeroką gamę nowatorskich zastosowań, wcześniej niedostępnych w monitorowaniu stanu agrochemicznego gleb.



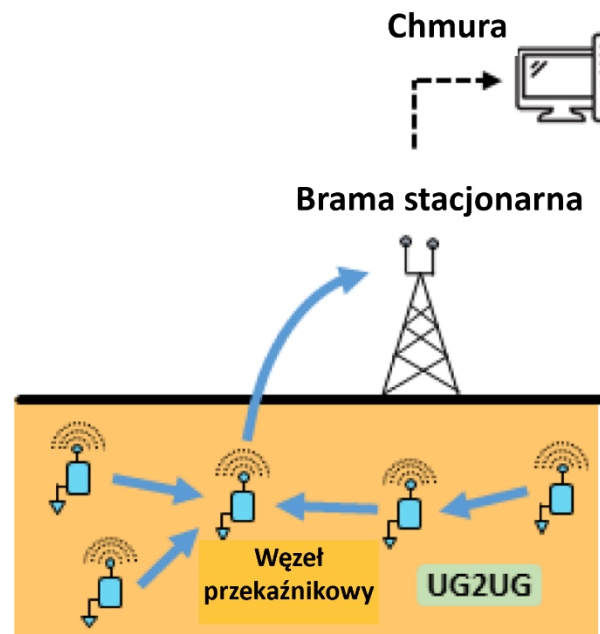
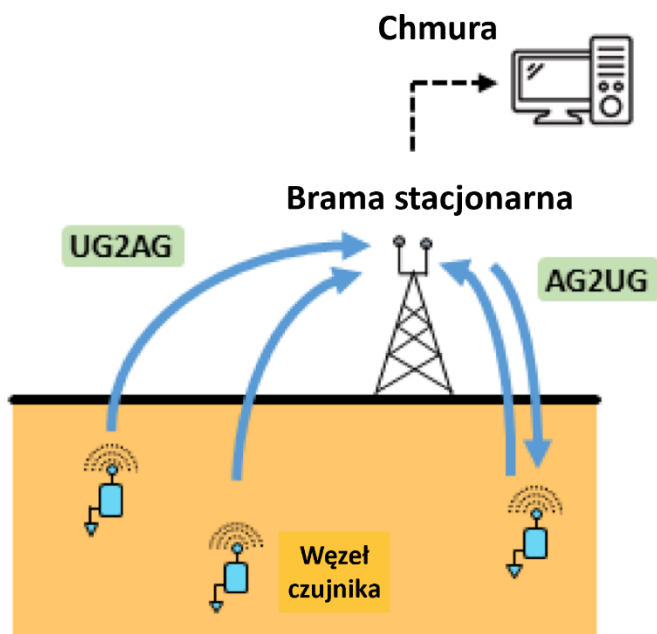
Przykłady węzłów czujników zakopanych 15 cm pod powierzchnią łąki z boczną sondą wilgotności. [Cariou i in. 2023 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Literatura:

- Cariou, C.; Moiroux-Arvis, L.; Pinet, F.; Chanet, J.-P. 2023. Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. *Sensors*, 23, 4058. DOI: 10.3390/s23084058.
- Wohwe Sambo D., Förster A. 2023. Wireless Underground Sensor Networks: A Comprehensive Survey and Tutorial. *ACM Computing Surveys*, V. 56, Iss. 4 Article No.: 86, P. 1 – 44. DOI: 10.1145/3625388.

Bezprzewodowe sieci czujników cd.

- ❖ Bezprzewodowe Sieci Czujników Podziemnych (WUSN) składają się z wielu węzłów bezprzewodowych, z których każdy ma jednostkę czujnikową, lokalną jednostkę przetwarzania, lokalną pamięć masową, radio, antenę i stałe źródło zasilania.

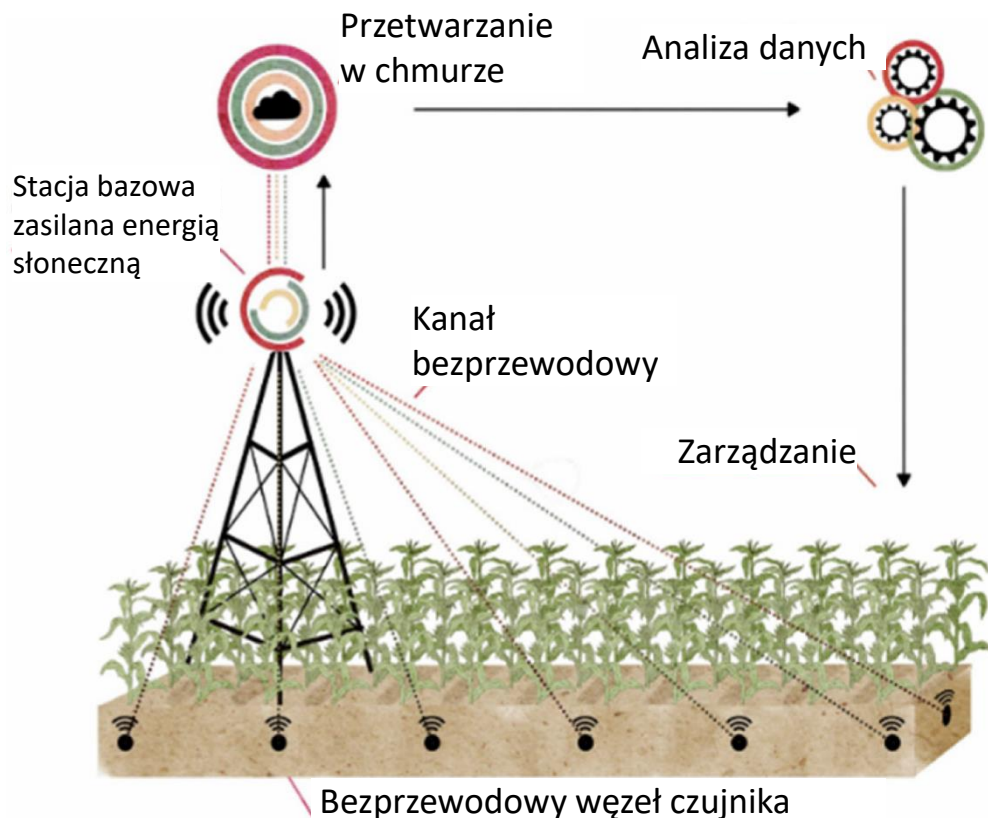


Dwa przykłady rozwiązań sieci WUSN: z niezależnymi zakopanymi węzłami czujników (po lewej) oraz z pośrednim węzłem przekaźnikowym i komunikacją UG2UG (po prawej) [Cariou i in. 2023 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Objaśnienia: **UG2UG** - łącze komunikacyjne podziemno-podziemne (underground-to-underground); **UG2AG** - łącze komunikacyjne podziemno-naziemne (underground-to-aboveground); **AG2UG** - łącze komunikacyjne naziemno-podziemne (aboveground to underground)

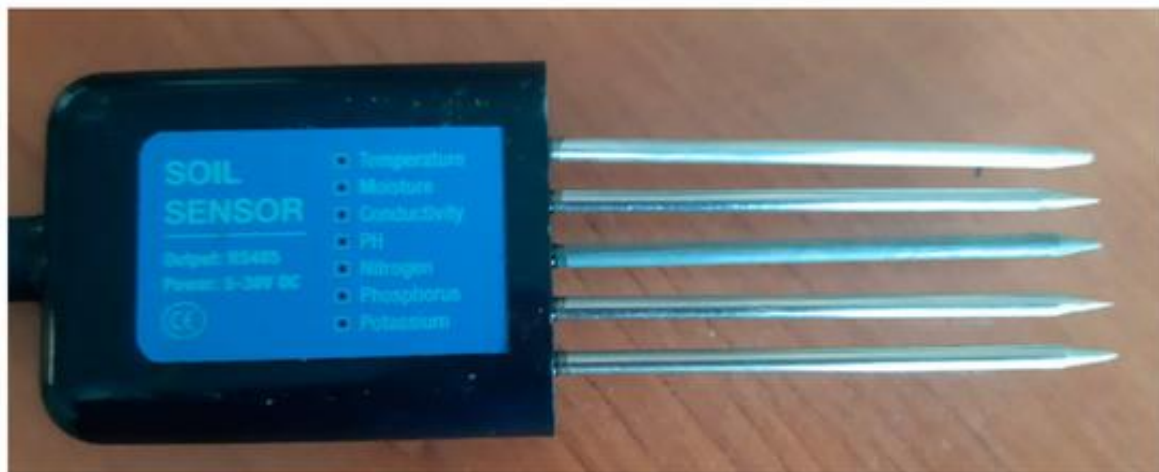
- ❖ Węzły bezprzewodowych sieci czujników podziemnych można zakopać w dowolnym miejscu, w tym w miejscu przejazdu pojazdów, bez zakłócania naziemnej działalności rolniczej. Obok tego zaletami systemu WUSN jest łatwość instalacji i zwiększona szybkość przesyłu odczytów z czujników do centralnego odbiornika w czasie rzeczywistym [Akyildiz, Stuntebeck 2006].
- ❖ Pod ziemią panuje szczególnie trudne środowisko dla komunikacji bezprzewodowej, co stwarza kilka wyzwań badawczych i technologicznych dla sieci WUSN.
- ❖ Dostarczanie energii jest jednym z kluczowych wyzwań dla WUSN. Stosowane są różne techniki pozyskiwania energii, takie jak bezprzewodowy transfer energii (sygnały o częstotliwości radiowej są konwertowane na energię elektryczną) oraz pozyskiwanie energii z naturalnych źródeł energii, np. energia cieplna (wykorzystuje gradienty temperatury do generowania mocy za pomocą generatorów termoelektrycznych), wibracja generowana przez różne obiekty (drgania mechaniczne przekształcane są w energię elektryczną za pomocą materiałów piezoelektrycznych).
- ❖ WUSN i IoUT bez wątpienia odegrają ogromną rolę w rolnictwie w najbliższej przyszłości, przyczyniając się do rozwoju inteligentniejszych i lepiej ukierunkowanych praktyk rolniczych [Cariou i in. 2023].

- ❖ Bezprzewodowe podziemne sieci czujników - Thoreau 2.0, stanowiące podstawę aplikacji Internetu Rzeczy zainstalowano na polu uprawnym (z płodozmianem kukurydza-soja) o promieniu 530 m położonym w Fermilab w USA. Sieć WUSN działa nieprzerwanie od września 2019 r., umożliwiając monitorowanie w czasie rzeczywistym objętościowej zawartości wody w glebie, temperatury gleby i przewodności elektrycznej gleby.
- ❖ Architektura systemu Thoreau 2.0 składa się z trzech elementów: (1) zakopanych węzłów czujników, (2) stacji bazowej oraz (3) interfejsu użytkownika.
- ❖ Węzeł czujnika składa się z zamkniętej obudowy z węgla/karbonatu (16 cm × 8 cm × 8,5 cm), w której znajduje się elektronika, źródło zasilania i antena nadawcza.
- ❖ Każdy węzeł czujnika jest zasilany przez źródło zawierające 4. baterie litowe AA. Analiza zużycia energii wykazała, że każdy węzeł czujnika może działać do 4,5 roku na jednym zestawie baterii.



Architektura bezprzewodowej podziemnej sieci czujników Thoreau 2.0. [Balivada i in. 2022 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

- ❖ Czujniki NPK gleby w ramach Internetu Rzeczy mają na celu dostarczanie dokładnych danych w czasie rzeczywistym dotyczących zawartości azotu, fosforu i potasu w glebie. Według producentów, czujniki zazwyczaj charakteryzują się dokładnością pomiaru rzędu $\pm 2\%$ (dokładność określa, jak bliski wartości prawdziwej jest wynik pomiaru - jest to miarą poprawności wyniku).



Dokładność pomiaru:	Wartość
- temperatury	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- wilgotności	$\pm 3\%$
- przewodności	$\pm 10\%$
- zawartości NPK	$\pm 2\%$
- zasolenia	$\pm 10\%$

Inteligentny czujnik firmy ComWinTop. [Valentina-Daniela i in. 2025 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Jakość wyników pomiarów uzyskiwanych za pomocą glebowych czujników IoT w warunkach terenowych

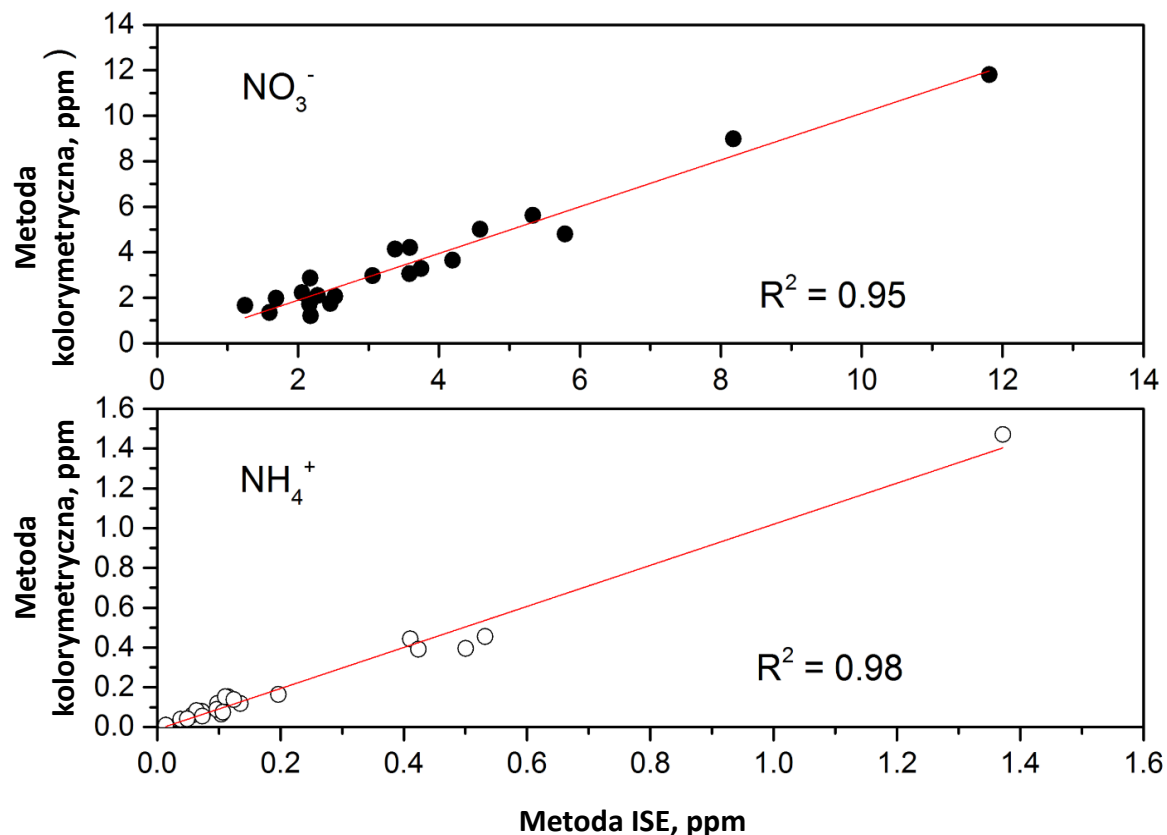
- ❖ Porównano wartości parametrów gleby uzyskane za pomocą czujnika IoT z elektrodami jonoselektywnymi z wynikami laboratoryjnych testów gleby.
- ❖ Badania zostały zrealizowane przez zespół badawczy z Nepalu i USA.

Parametr	Analiza laboratoryjna	Metoda czujnikowa	Różnica między metodami, %
pH	6,8	6	11,76
Azot (N), mg/kg	83	89	-7,23
Fosfor (P), mg/kg	51	45	11,76
Potas (K), mg/kg	34	32	5,88
Przewodność, $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mikrosiemensy na centymetr)	189	197	-4,23

Porównanie wartości parametrów glebowych określonych za pomocą czujnika i metodami laboratoryjnymi [na podstawie: Khanal i in. 2024]

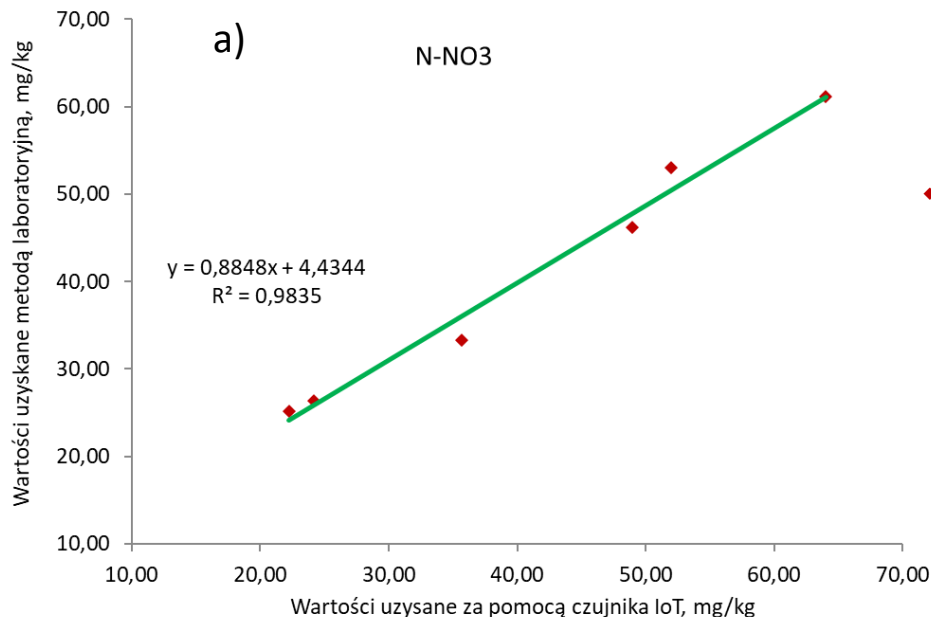
Jakość wyników pomiarów uzyskiwanych za pomocą glebowych czujników IoT w warunkach terenowychcd.

- ❖ Porównano wyniki badań zawartości NO_3^- i NH_4^+ w próbkach wody i gleby uzyskane za pomocą czujników do wykrywania analitów w postaci elektrod jonoselektywnych (Ion selective electrodes - ISE) oraz metodą kolorymetryczną.
- ❖ Badania zostały zrealizowane przez Birmingham Institute for Forest Research w Wielkiej Brytanii.



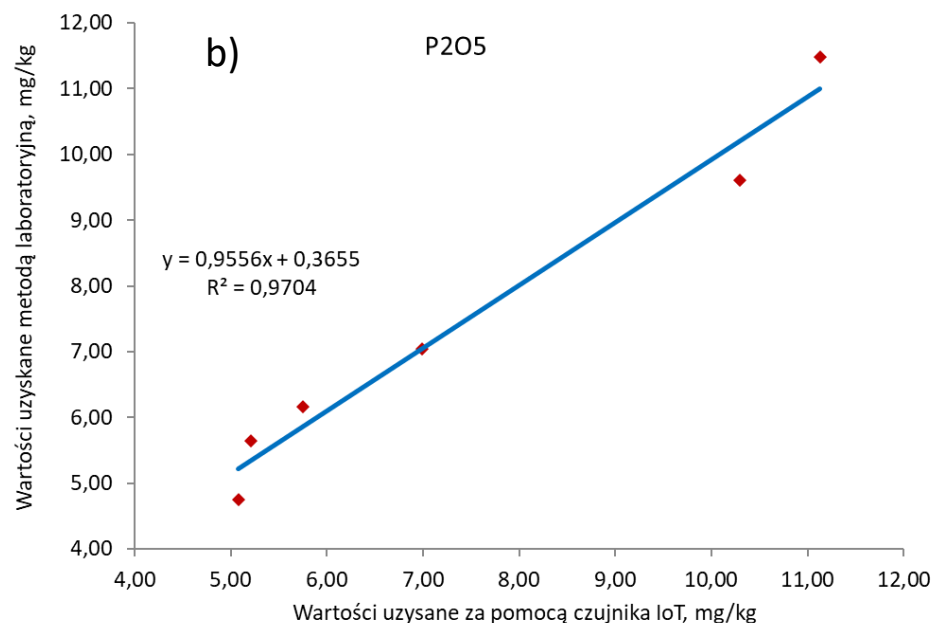
Porównanie wyników oznaczania NO_3^- (góra) i NH_4^+ (dół) w próbkach wody i gleby przy użyciu elektrod jonoselektywnych ISE i metod laboratoryjnych dla 21 próbek. W przypadku ISE do porównania wykorzystano średnie wartości uzyskane z co najmniej 3 różnych elektrod [Choosang i in. 2018 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY; <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Jakość wyników pomiarów uzyskiwanych za pomocą glebowych czujników IoT w warunkach terenowych cd.



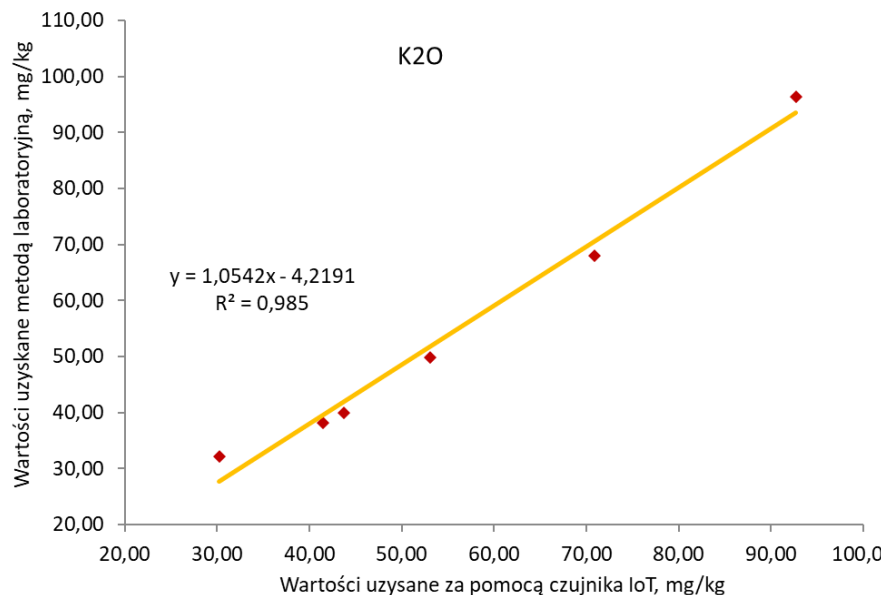
Porównanie wyników oznaczania N-NO₃ (a) i P₂O₅ (b) w próbkach gleby przy użyciu czujników optycznych IoT i technik laboratoryjnych dla 6 próbek [na podstawie: Jain i in. 2023]

- ❖ Porównano wyniki badań zawartości N, P i K w próbkach gleby oraz jej pH uzyskane za pomocą czujników optycznych IoT oraz w oparciu o standardowe metody laboratoryjne.
- ❖ Badania zostały zrealizowane w Shobhit Institute of Engineering & Technology z siedzibą w Meerut w stanie Uttar Pradesh w Indiach.

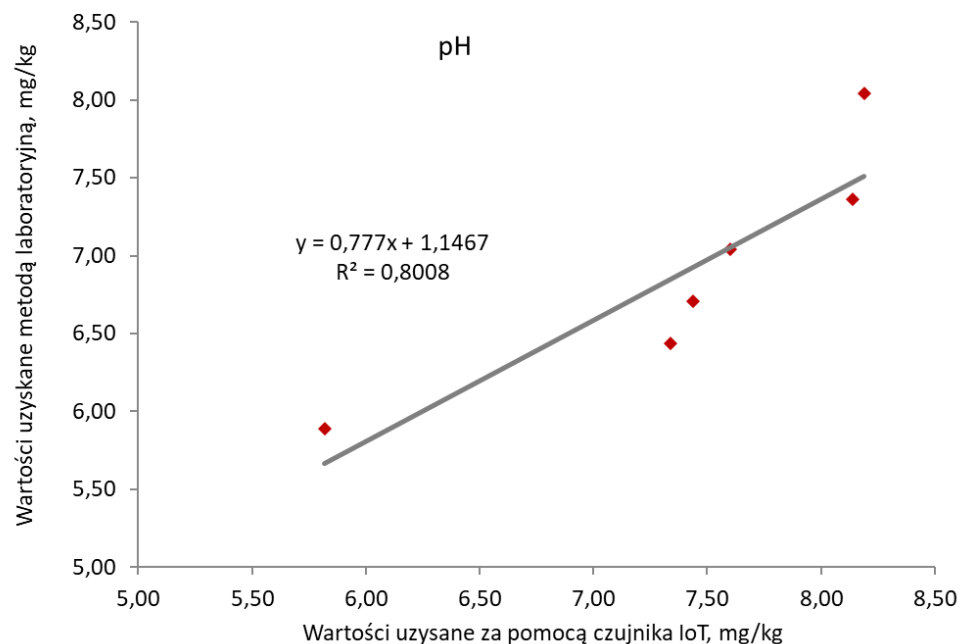


Literatura: Jain N., Awasthi Y., Jain R.K. 2023. An IoT-based soil analysis system using optical sensors and multivariate regression. International Journal of Experimental Research and Review, 31, 23-32. DOI: <https://doi.org/10.52756/10.52756/ijerr.2023.v31spl.003>

Jakość wyników pomiarów uzyskiwanych za pomocą glebowych czujników IoT w warunkach terenowych cd.

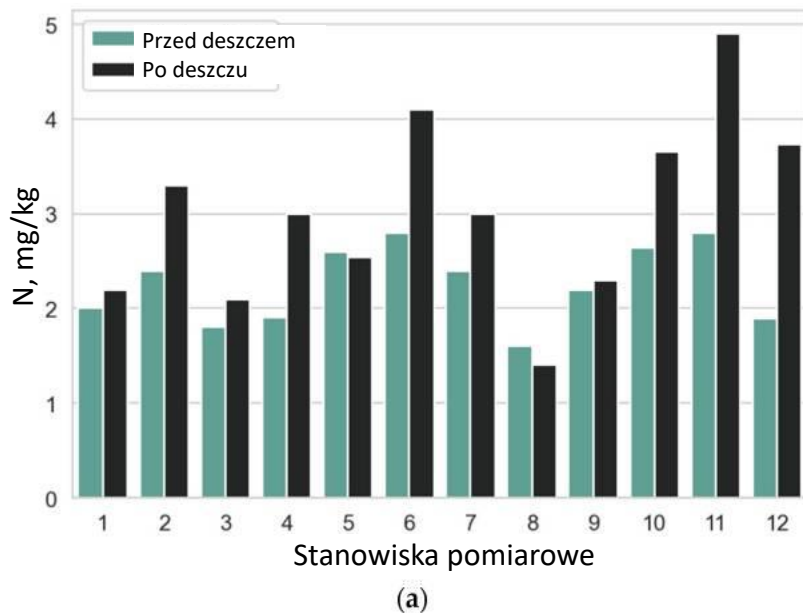


Porównanie wyników oznaczania K₂O (c) i pH (d) w próbkach gleby przy użyciu czujników optycznych IoT i technik laboratoryjnych dla 6 próbek [na podstawie: Jain i in. 2023].



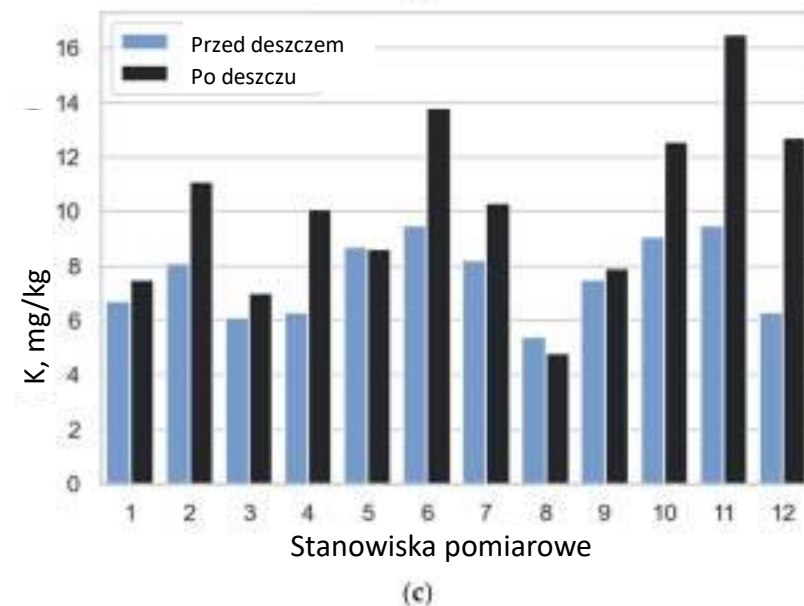
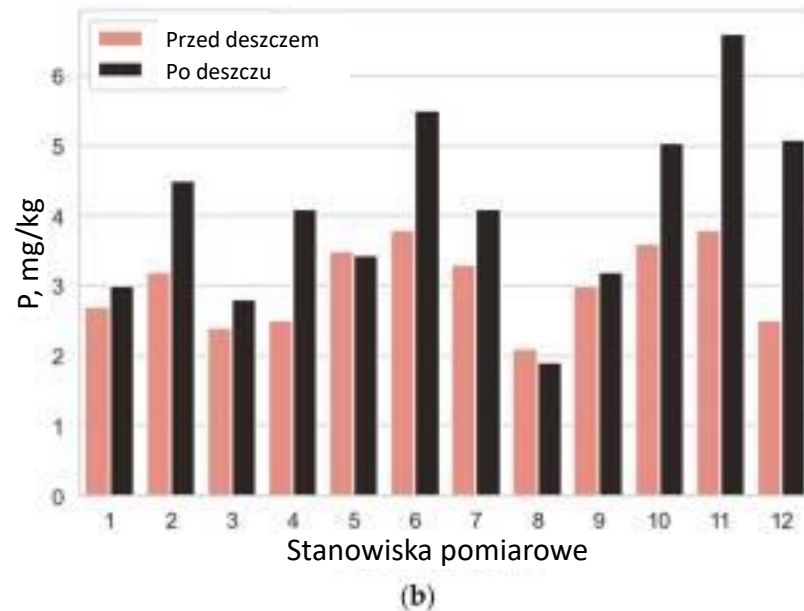
Jakość wyników pomiarów uzyskiwanych za pomocą glebowych czujników IoT w warunkach terenowych cd.

- ❖ Badania przeprowadzono w ogrodzie botanicznym w Lizbonie w Portugalii.

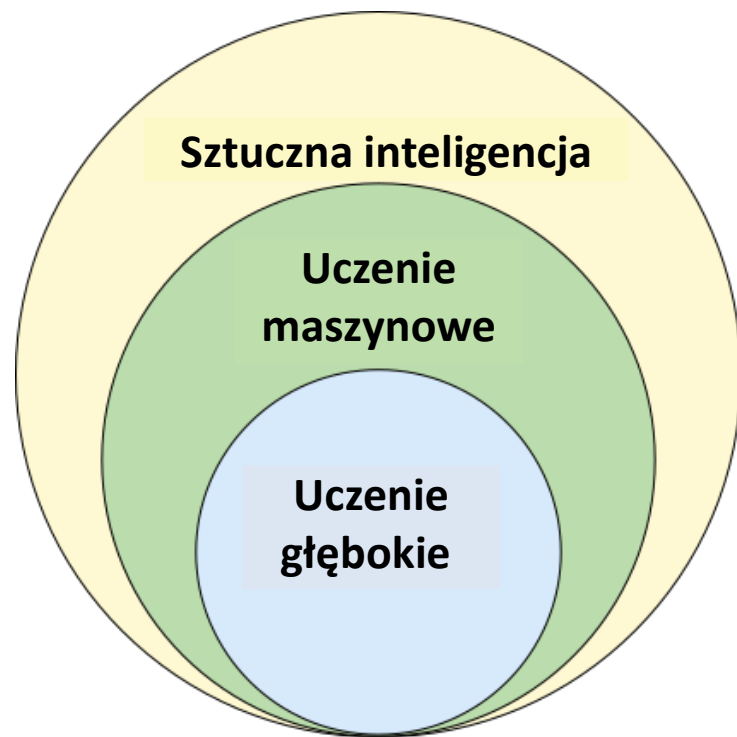


Średnie zawartości azotu, fosforu i potasu w glebie przed i po opadach deszczu zmierzone za pomocą systemu opartego na technologii IoT, który wykorzystuje bezprzewodową sieć czujników: (a) dane dotyczące azotu; (b) dane dotyczące fosforu; oraz (c) dane dotyczące potasu [Postolache i in. 2022 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY; (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)).

Literatura: Postolache S., Sebastião P., Viegas V., Postolache O., Cercas F. 2022. IoT-Based Systems for Soil Nutrients Assessment in Horticulture. Sensors (Basel). 30;23(1):403. doi: 10.3390/s23010403. PMID: 36617000; PMCID: PMC9823829.



- ❖ Sztuczna inteligencja umożliwia szybkie i bardzo precyzyjne przetwarzanie ogromnych ilości danych.
- ❖ Termin „sztuczna inteligencja”, została wprowadzony przez profesora Stanforda Johna McCarthy'ego w 1955 roku, który ją zdefiniował jako „naukę i inżynierię tworzenia inteligentnych maszyn”. W informatyce oznacza także tworzenie modeli i programów symulujących choć częściowo zachowania inteligentne.
- ❖ Uczenie maszynowe (ML) to podzbiór sztucznej inteligencji. Jest to technika programowania komputerowego, która umożliwia im uczenie i ulepszanie się na podstawie danych i z doświadczenia. Procesy uczenia i doskonalenia się nie są zaprogramowane.
- ❖ Uczenie głębokie (ang. Deep Learning - DL) jest zaawansowaną formą uczenia maszynowego, która wykorzystuje skomplikowane struktury zwane sztucznymi sieciami neuronowymi do analizy danych i podejmowania decyzji. Charakteryzuje się wieloma warstwami przetwarzania informacji, które naśladują strukturę i funkcje ludzkiego mózgu.



Uczenie maszynowe jako podzbiór sztucznej inteligencji. Źródło: Wikimedia Commons - licencja Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International licens; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AI_hierarchy.svg.

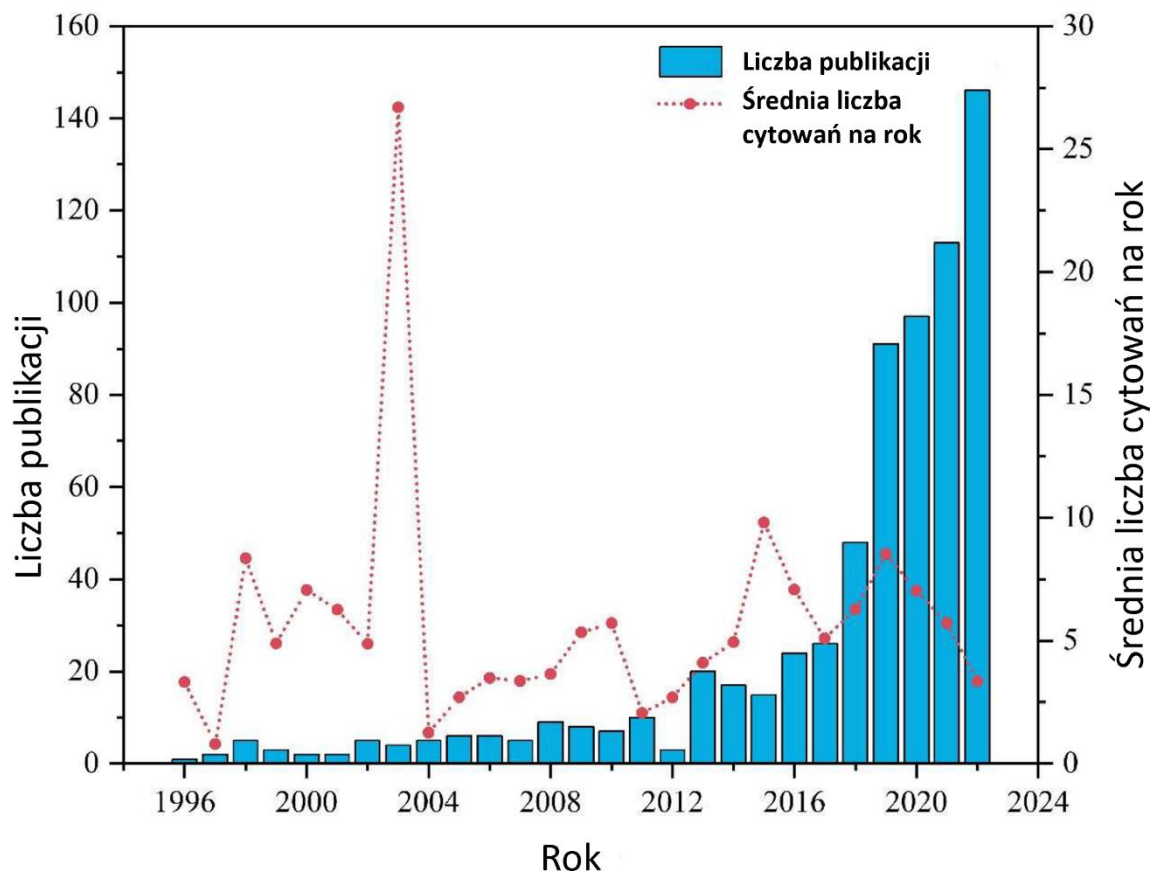
- ❖ Integracja glebowych czujników NPK IoT ze sztuczną inteligencją (AI) i uczeniem maszynowym (ML) umożliwia kompleksową analitykę predykcyjną pozyskiwanych przez czujniki danych.
 - ❖ Algorytmy AI, oparte na uczeniu maszynowym, mogą analizować dane w czasie rzeczywistym zbierane przez czujniki IoT rozmieszczone na polach uprawnych w celu monitorowania parametrów gleby, takich jak poziom wilgotności, zawartość składników odżywczych i poziom pH, i generować dokładne prognozy i spersonalizowane zalecenia nawozowe. W uczeniu maszynowym wykorzystywane są m.in. takie algorytmy, jak: Las losowy (random forests), Maszyny wektorów nośnych (support vector machines) i Sieci neuronowe (neural networks).
 - ❖ Algorytmy uczenia maszynowego stają się coraz bardziej wyrafinowane, zdolne do analizowania ogromnych ilości danych glebowych z niezrównaną dokładnością i wydajnością.
- ❖ ***Tekst wygenerowany przez sztuczną inteligencję: „Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe (ML) przekształcają testy gleby, zapewniając szybsze, dokładniejsze i bardziej kompleksowe oceny stanu gleby. Dzięki integracji czujników, analizy danych i algorytmów ML, sztuczna inteligencja może monitorować parametry gleby w czasie rzeczywistym, przewidywać trendy żyzności i wykrywać wczesne oznaki degradacji lub zanieczyszczenia. Pozwala to rolnikom podejmować decyzje oparte na danych i optymalizować praktyki zarządzania glebą.”***

Właściwości i ograniczenia różnych algorytmów uczenia maszynowego stosowanych w badaniach gleby [Shin i in. 2025 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Algorytm	Właściwości	Ograniczenia
Regresja częściowa najmniejszych kwadratów (PLSR)	Skuteczna w redukcji kolinearności	Niska skuteczność w przypadku relacji nieliniowych
Regresja maszyn wektorów nośnych (SVMR)	Obsługuje relacje nieliniowe z wysoką wydajnością uogólnienia	Mniejsza skuteczność w przypadku danych nakładających się
Las losowy (RF)	Odporny na nadmierne dopasowanie i szum	Zmniejszona dokładność w przypadku złożonych zbiorów danych
Drzewa regresji z wzmocnieniem gradientowym (GBRT)	Wysoka dokładność prognozowania dzięki optymalizacji opartej na gradiencie	Słaba obsługa szumu
Ekstremalne wzmocnienie gradientowe (XGBoost)	Przewycięża powolne uczenie się i wysoką wydajność uogólniania	Złożone dostrajanie hiperparametrów
Ekstremalna maszyna ucząca się (ELM)	Przewycięża powolne uczenie się i wysoką wydajność uogólniania	Podatność na nadmierne dopasowanie z powodu braku kontroli ryzyka strukturalnego
Kubista	Obsługuje relacje nieliniowe w skomplikowanych zbiorach danych	Ograniczona interpretowalność z powodu struktury opartej na regułach
Sztuczna sieć neuronowa (ANN)	Wspierana przez zaawansowane modele matematyczne i narzędzia programowe	Wymaga integracji z algorytmem optymalizacyjnym
Konwolucyjna sieć neuronowa (CNN)	Poprawia uogólnienie sieci i zapobiega nadmiernemu dopasowaniu	Złożone dostrajanie architektury
Sieć neuronowa z propagacją wsteczną (BPNN)	Uczy się poprzez propagację błędów wstecznych; skuteczny w przypadku relacji nieliniowych	Powolne tempo szkolenia i ryzyko zbieżności do lokalnych minimów

Literatura: Shin S.K., Lee S.J., Park J. H. 2025. Prediction of Soil Properties Using Vis-NIR Spectroscopy Combined with Machine Learning: A Review. Sensors, 25(16), 5045. <https://doi.org/10.3390/s25165045>

- ❖ Notuje się szybki wzrost znaczenia sztucznej inteligencji, w kontekście badania gleb rolniczych. W ciągu ostatnich trzech dekad w 39 czasopismach gleboznawczych opublikowanych zostało łącznie 680 artykułów związanych ze sztuczną inteligencją - zwłaszcza w ostatniej dekadzie nastąpiła znaczna tendencja wzrostowa liczby publikacji. Wskazuje to na duży potencjał aplikacyjny AI w zakresie dotyczącym zarządzania glebą, rozwiązywania problemów związanych z glebą oraz poprawy dokładności produkcji rolnej i oceny jakości gleb.

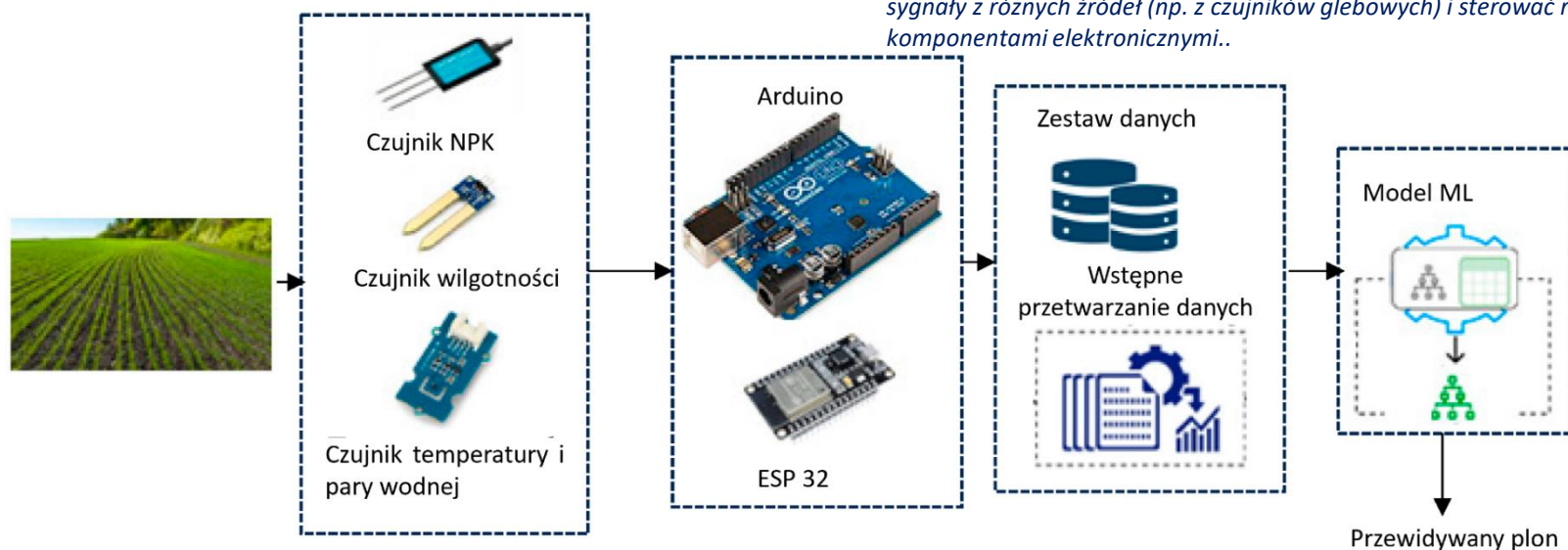


Trendy w zakresie liczby publikacji i średniej częstotliwości cytowań na rok na temat sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego (ML) w 39 czasopismach gleboznawczych [Jia i in. 2024 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

Systemy wspomagające zarządzanie nawożeniem w oparciu o IoT z uczeniem maszynowym

- ❖ W ostatnich latach opracowano na świecie wiele zintegrowanych systemów wspomagania decyzji w zakresie nawożenia upraw, opartych na IoT i wykorzystujących modele uczenia maszynowego. Między innymi Bouni i in. [2024] opracowali modele uczenia maszynowego, w szczególności przy użyciu algorytmów „Wzmocnienie gradientowe”, „Drzewo decyzyjne” i „Las losowy” do predykcji plonów i tworzenia zaleceń nawozowych. Wymienione algorytmy osiągnęły dokładności wyników, odpowiednio na poziomie 98,90%, 98,48% i 99,31%. Wyniki te pokazują potencjał połączenia IoT i uczenia maszynowego w celu optymalizacji wykorzystania nawozów i poprawy zarządzania uprawami w inteligentnym rolnictwie.

Arduino to system (płytkę uruchomieniową), który może odczytywać sygnały z różnych źródeł (np. z czujników glebowych) i sterować różnymi komponentami elektronicznymi..

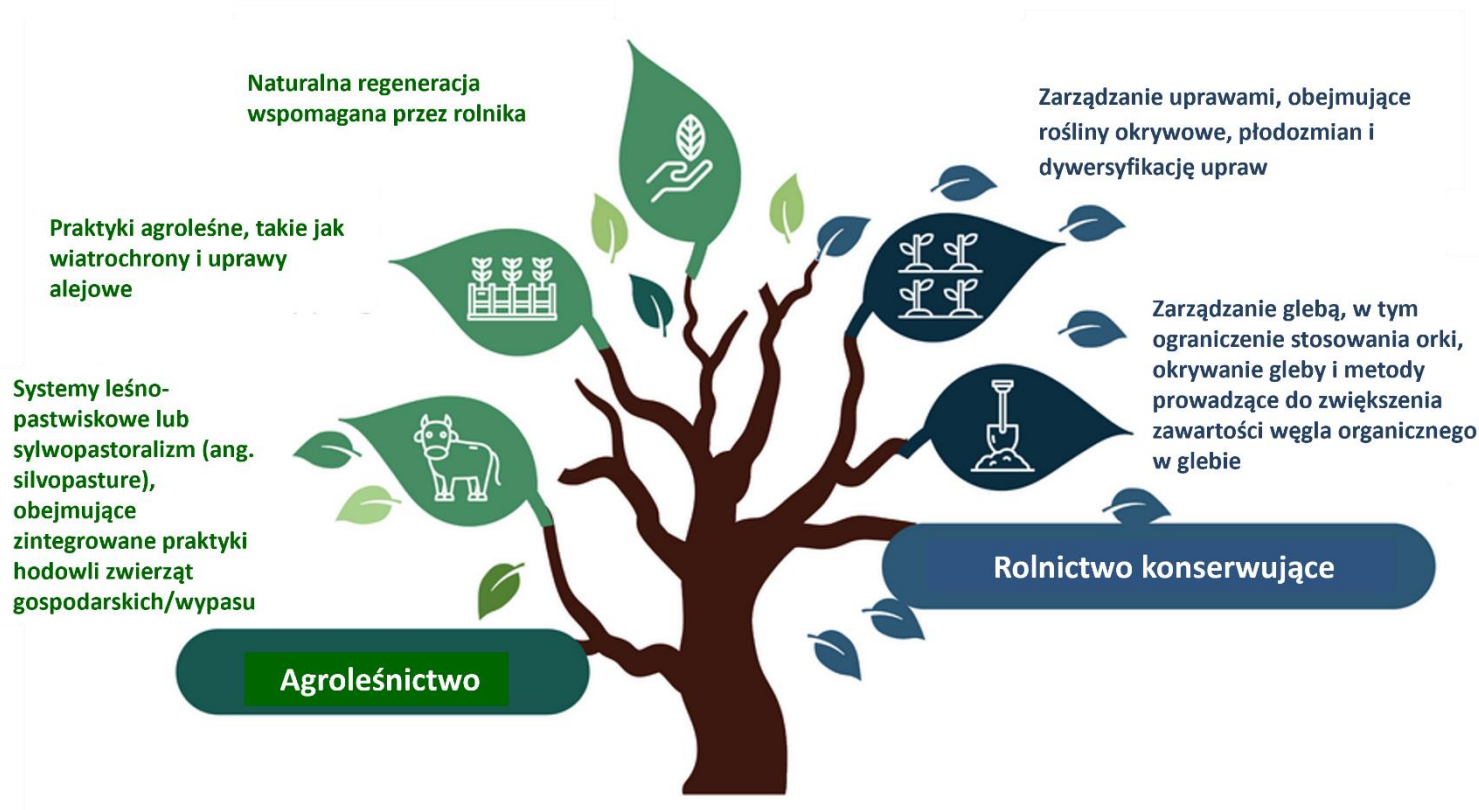


Architektura systemu prognozowania nawożenia upraw opartego na IoT z uczeniem maszynowym [Bouni i in. 2024- licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].



Oznaczanie węgla organicznego w glebie w aspekcie rozwoju rolnictwa regeneracyjnego

- ❖ Rolnictwo regeneracyjne to system zasad i praktyk rolniczych, które mają na celu budowanie i poprawę żyzności gleby, przy jednoczesnym sekwestrowaniu i magazynowaniu CO₂ z atmosfery, zwiększaniu różnorodności upraw w gospodarstwach rolnych oraz poprawie w nich gospodarki wodą i energią.



Ogólna koncepcja rolnictwa regeneracyjnego. Źródło: ARASG 2021.

Oznaczanie węgla organicznego w glebie w aspekcie rozwoju rolnictwa regeneracyjnego cd.

- ❖ Rolnictwo jest znaczącym źródłem emisji dwutlenku węgla, ale ma też ogromny potencjał jego sekwestracji poprzez praktyki zwiększające zawartość węgla organicznego w glebie (SOC). Jednak bariery, takie jak wysoki koszt monitorowania SOC, brak wiedzy na temat regeneracyjnych praktyk rolniczych i ograniczone zasoby finansowe utrudniają przejście na zrównoważone rozwiązania [Omdena 2025].
- ❖ Ocena zawartości węgla organicznego w glebie (SOC) jest kluczowa dla ustalenia stanu zdrowotności gleby i wspierania wysiłków na rzecz sekwestracji węgla. Tradycyjne metody, takie jak trawienie na mokro i spalanie na sucho, są czasochłonne i pracochłonne, co wymaga opracowania nieniszczących, opłacalnych i wykonywanych w czasie rzeczywistym pomiarów in situ [Loria i in. 2024].
- ❖ Wyzwaniem dla zwiększenia regeneracyjnych praktyk rolniczych jest tani pomiar SOC w czasie i zrozumienie, w jaki sposób na SOC wpływają regeneracyjne praktyki rolnicze i inne czynniki środowiskowe oraz praktyki zarządzania gospodarstwem [Capetz i in. 2025].



Źródło: EU CAP Network

Literatura:

- Omdena 2025. Measuring Soil Organic Carbon with AI for Regenerative Farming Practices. [Dostęp: 26.05.2025]. Dostępny w internecie: <https://www.omdena.com/projects/ai-regenerative-farming>.
- Capetz M., Sharma S., Padilha R., Olsen P., Kiciman E., Chandra R. 2024. Enabling Adoption of Regenerative Agriculture through Soil Carbon Copilots. arXiv preprint arXiv:2411.16872
- Loria N., Lal R., Chandra R. 2024. Handheld In Situ Methods for Soil Organic Carbon Assessment. Sustainability, 16, 5592. <https://doi.org/10.3390/su16135592>
- EU CAP Network. [Dostęp: 26.05.2025]. Dostępny w internecie: https://eu-cap-network.ec.europa.eu/publications/eu-cap-network-focus-group-regenerative-agriculture-soil-health_en

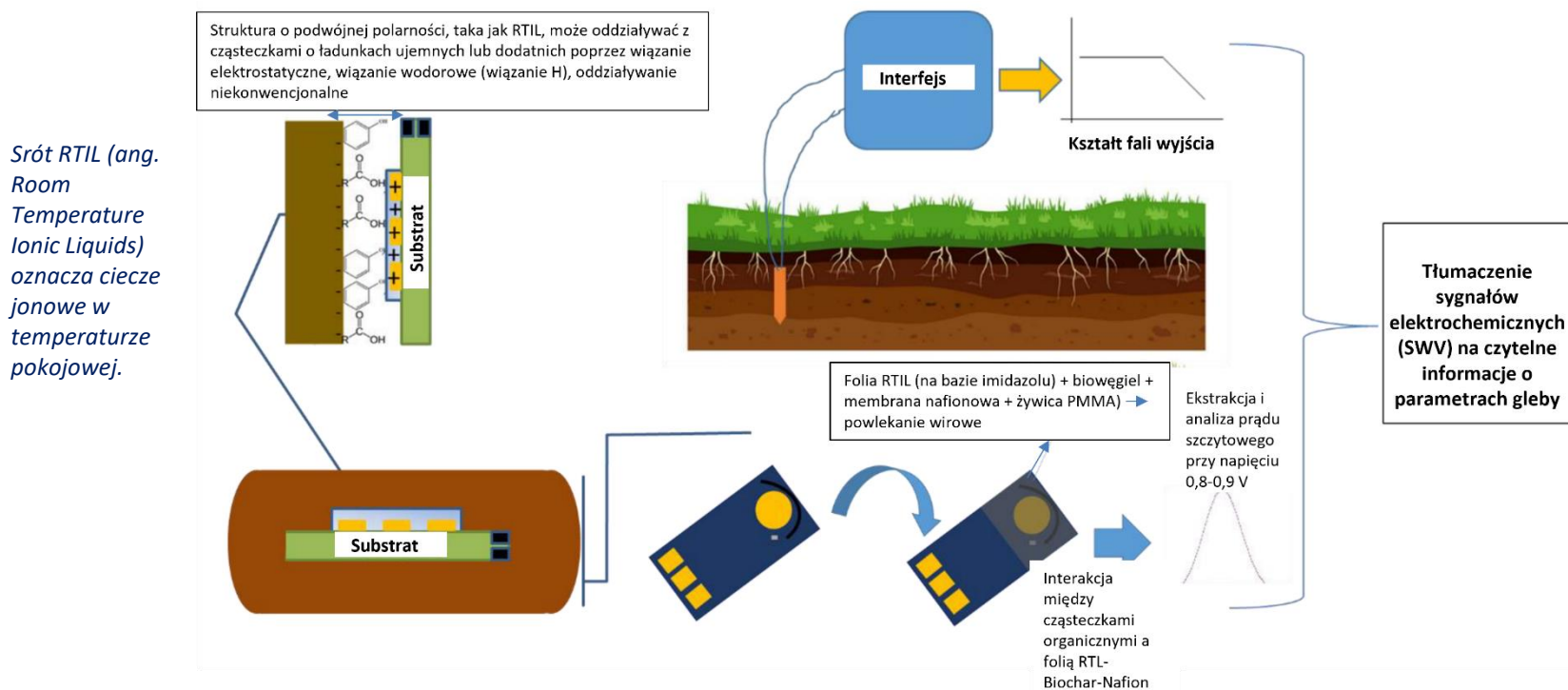
- ❖ Dokonano oceny stanu nagromadzenia węgla organicznego (C_{org}) w warstwie 0-30 gleb trwałych użytków zielonych (TUZ), na podstawie danych monitoringowych KSChR pochodzących z 860 punktów pomiarowo-kontrolnych zlokalizowanych na TUZ w Polsce [Pietrzak, Hołaj-Krzak 2022; Pietrzak, Urbaniak 2022]. Stwierdzono, w szczególności, że:
- przeciętna zawartość węgla organicznego w warstwie 0-30 cm gleb mineralnych TUZ w Polsce wynosi 2,44% (i jest 2,2 razy większa w porównaniu z przeciętną ilością C_{org} w glebach gruntów ornych), a w glebach pochodzenia organicznego – 10,42%;
 - zasoby węgla organicznego w warstwie na całej powierzchni gleb TUZ wynoszą 412,7 mln ton C_{org} , w tym 253,3 mln ton w glebach mineralnych i 159,4 mln ton w glebach pochodzenia organicznego;
 - 50% gleb mineralnych TUZ charakteryzuje się zawartością węgla organicznego poniżej jego progu krytycznego (poniżej którego może nastąpić potencjalnie poważny spadek jakości gleby), który jak się powszechnie przyjmuje wynosi 2%, przy czym w ¼ z nich przeciętna zawartość C_{org} wynosi 1,03%;
 - istnieją znaczne możliwości zwiększenia zasobów C_{org} w glebach łąkowych, poprzez ich renowację (jak się szacuje - ponad 50% z nich jest zdegradowanych);
 - poprzez zwiększenie poziomu zawartości C_{org} o 1% na połowie areału gleb mineralnych TUZ można uzyskać przyrost w nich zasobów węgla organicznego o 51,9 mln ton, natomiast gdyby średnią zawartość C_{org} w 25% gleb mineralnych UZ najbardziej ubogich w materię organiczną zwiększyć do poziomu 2%, uzyska się przyrost zasobów węgla organicznego o 25,3 mln ton.

Literatura:

- Pietrzak S., Hołaj-Krzak J. 2022. The content and stock of organic carbon in the soils of grasslands in Poland and the possibility of increasing its sequestration. Journal of Water and Land Development No. 54 (VII–IX) p. 68–76. DOI: 10.24425/jwld.2022.141556.
- Pietrzak S., Urbaniak M. 2022. Ocena zasobów węgla organicznego w glebach użytków zielonych według kategorii glebowych na podstawie danych monitoringowych KSChR. Opracowanie przygotowane na zlecenie MRiRW w ramach umowy na realizację w 2022 r. dotacji celowej dla Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego – PIB. Falenty: ITP-PIB. ss. 23 /maszynopis/.

Możliwości wykrywania węgla organicznego w glebie za pomocą czujników IoT

- ❖ Od wielu lat ośrodki badawcze na świecie prowadzą intensywne prace nad opracowaniem efektywnych narzędzi do oznaczenia węgla organicznego w glebie, zachęających rolników do wprowadzenia rolnictwa węglowego i włączenia dokładnej oceny SOC do skutecznych strategii działań na rzecz klimatu.
- ❖ Ostatnio w USA opracowano metodę mierzenia zawartości węgla organicznego w glebie za pomocą elektrochemicznych czujników zdalnych [Dhamu i in. 2024].



Schematyczny opis czujnika do dynamicznego śledzenia i wykrywania węgla organicznego w glebie [Dhamu i in. 2024]

- licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Literatura: Dhamu V.N., Somenahally A.C., Paul A. Muthukumar S., Prasad S. Characterization of an In-Situ Soil Organic Carbon (SOC) via a Smart-Electrochemical Sensing Approach. Sensors 2024, 24, 1153. <https://doi.org/10.3390/s24041153>

Falenty, Al. Hrabska 3, 05-090 Raszyn; tel.: 22 628 37 63; itp@itp.edu.pl; www.itp.edu.pl

- ❖ Stwierdzono, że metoda sensorowa opracowana przez Dhamu i in. [2024] określi zawartość SOC w mg/kg ze średnią dokładnością $\leq 5\%$ w porównaniu z metodą referencyjną. Wskazuje to, że ma ona potencjał do zastąpienia obecnych standardowych praktyk oznaczania SOC w laboratorium.

Porównanie poziomów SOC między metodami referencyjnymi i czujnikowymi dla dziesięciu pojedynczych próbek gleby. Wartości $\pm$ w nawiasach oznaczają niepewności standardowe pomiaru [Dhamu i in. 2024].

Kod próbki	Metoda referencyjna, mg/kg	Metoda czujnikowa, mg/kg	Różnica między metodami, %
T1	4438 (± 339 mg/kg)	4341,6	2,2
T2	7100 (± 107)	7346	3,5
T3	1072 (± 42)	973	9,2
T4	19273 (± 166)	17104,5	11,3
T5	9919 (± 299)	9636,9	2,8
T6	6693 (± 75)	7091,4	6
T7	30228 (± 542)	28590,7	5,4
T8	4850 (± 62)	4777	1,5
T9	5972 (± 79)	5849,5	2,1
T10	5427 (± 44)	5203,7	4,1

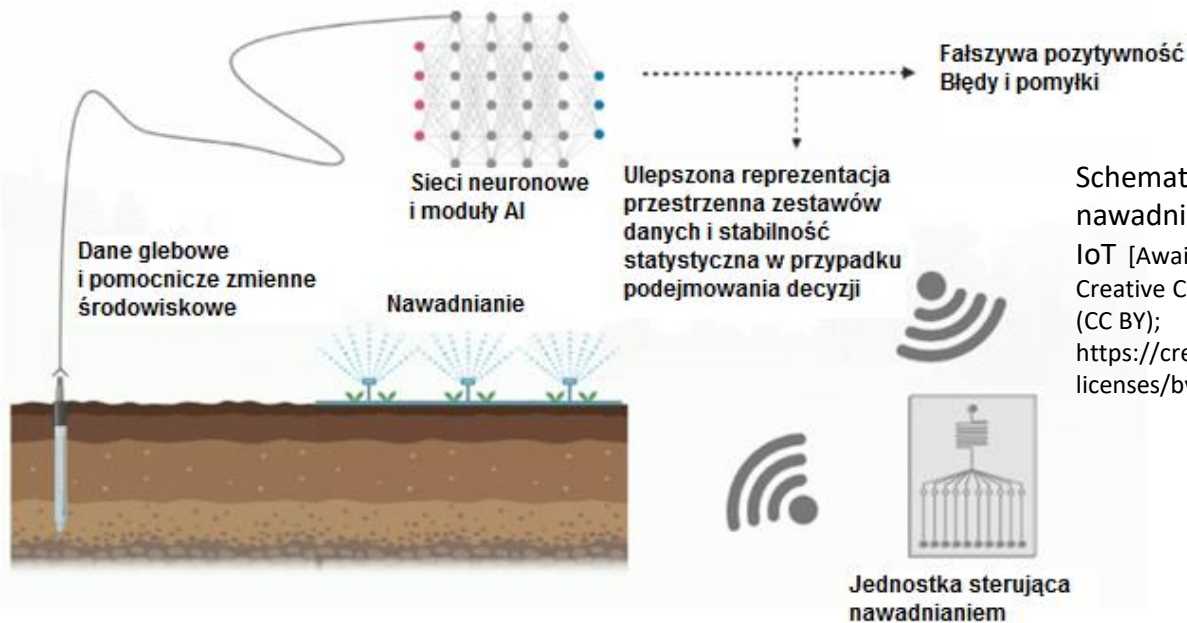
- ❖ Proponowane rozwiązanie może być tagowane (tagowanie, w kontekście Internetu Rzeczy, to proces oznaczania urządzeń i obiektów w celu ich identyfikacji i zarządzania w sieci) i ma możliwość jako inteligentny czujnik do łączenia się z platformami obliczeniowymi za pośrednictwem przewodowego lub bezprzewodowego kanału komunikacyjnego, który może być wykorzystywany do długoterminowego monitorowania zawartości węgla organicznego w glebie.

Korzyści z wykorzystania glebowych czujników IoT do monitorowania gleby

Efektywność wykorzystania glebowych czujników IoT w produkcji rolnej [na podstawie: Duguma, Bai 2025].

Obszar zastosowania	Opis	Poprawa efektywności	Literatura - Duguma, Bai [2025] za:
Monitoring gleby	Czujniki IoT mierzą wilgotność gleby, temperaturę i zawartość składników odżywczych. Dane te pozwalają rolnikom stosować nawadnianie i nawożenie dokładnie wtedy i tam, gdzie jest to potrzebne, zmniejszając ilość odpadów i zwiększając plony.	20% wzrost plonów i 30% redukcja zużycia wody dzięki systemom monitorowania gleby opartym na IoT.	Kim i in <u>2019</u> , <u>2020</u> ; Kim, Lee <u>2022</u>
Wykorzystanie wody	Systemy IoT optymalizują zużycie wody, co prowadzi do znacznych oszczędności jej zasobów.	Inteligentne systemy nawadniania oparte na IoT pozwalają zaoszczędzić do 30% wody w porównaniu z tradycyjnymi metodami nawadniania.	Ayaz i in. <u>2019</u>

- ❖ Inteligentne systemy nawadniające oparte na technologii IoT wykorzystują czujniki bezprzewodowe, przetwarzanie w chmurze i sztuczną inteligencję, aby zautomatyzować dystrybucję wody w oparciu o warunki środowiskowe w czasie rzeczywistym, zapewniając uprawom optymalną ilość wody, minimalizując jednocześnie straty spowodowane parowaniem i spływem.



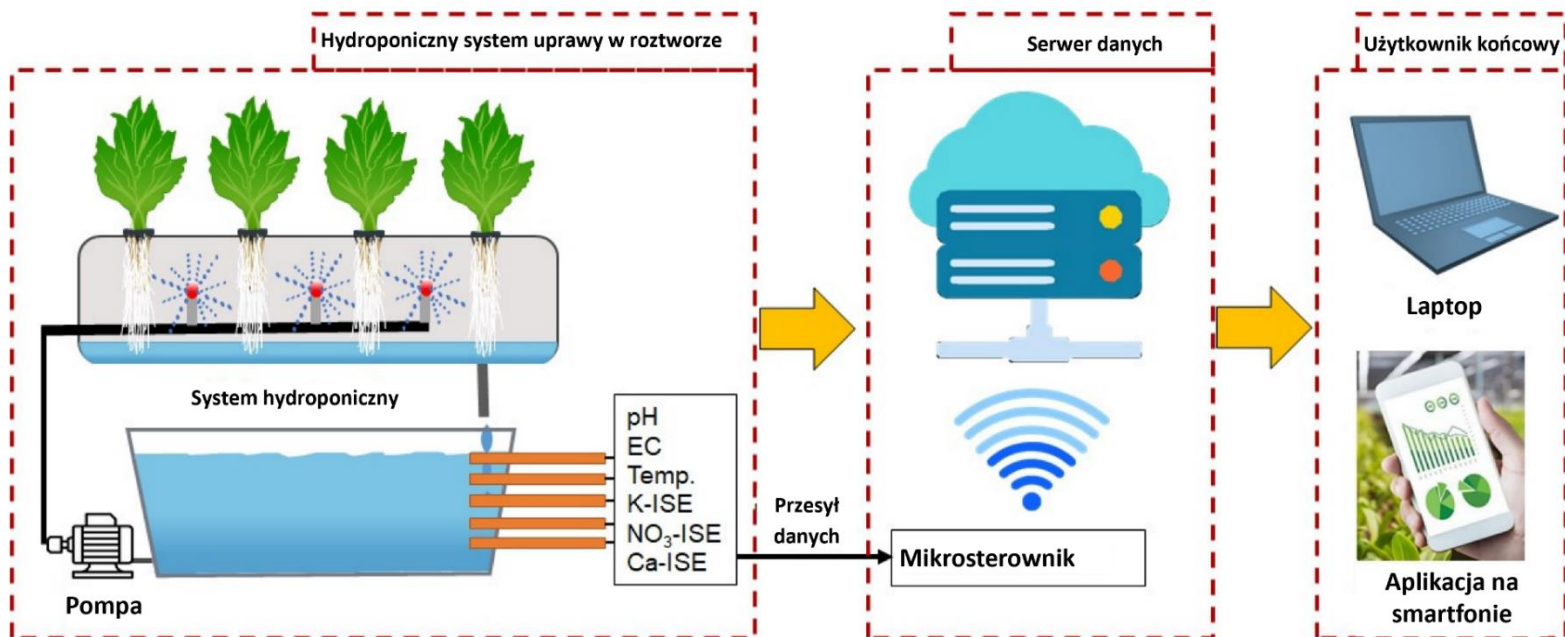
Schemat inteligentnego nawadniania opartego na IoT [Awai i in. 2023 - licencja Creative Commons Attribution (CC BY); <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>].

- ❖ Wdrożono inteligentne systemy nawadniania, które wykorzystują czujniki, kontrolery, siłowniki, sieci komunikacyjne i narzędzia do analizy danych w celu monitorowania i kontrolowania dostarczania wody do upraw zgodnie z ich potrzebami i warunkami środowiskowymi. Systemy te mają na celu poprawę efektywności wykorzystania wody, zmniejszenie marnotrawstwa wody i spływu, poprawę wzrostu i jakości upraw oraz oszczędność energii i zmniejszenie nakładów pracy.
- ❖ Inteligentny system nawadniania oparty na IoT zastosowano m.in. na dużej farmie bawełny w Teksasie w USA. W rezultacie zużycie wody zostało zmniejszone o 40%, a plony wzrosły o 25% w pierwszym roku [Saini 2024].

Literatura:

- Awais M., Naqvi S.M.Z.A., Zhang H. et al. 2023. AI and machine learning for soil analysis: an assessment of sustainable agricultural practices. Bioresour. Bioprocess. 10, 90. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00710-y>
 - Saini N. 2024. Enhancing Agriculture with IoT-based Smart Irrigation Systems. [Dostęp: 28.05.2025]. Dostępny w internecie: <https://www.hashstudios.com/blog/enhancing-agriculture-with-iot-based-smart-irrigation-systems/>

- ❖ Technologie sensoryczne odgrywają kluczową rolę w optymalizacji funkcjonowania upraw hydroponicznych, zapewniając precyzyjną kontrolę nad dostarczaniem składników odżywczych, co poprawia zdrowie roślin i zwiększa ich plony oraz zapobiega również przenawożeniu, które może szkodzić środowisku. Duże farmy hydroponiczne korzystają z tych technologii.
- ❖ Badania wykazały, że integracja czujników jonoselektywnych z systemami uprawy hydroponicznej w roztworze spowodowała 25% zmniejszenie strat składników odżywczych i znaczny wzrost plonów [Reza i in. 2025 za: Kashyap, Kumar 2021].



Architektura systemu rozwiązań hydroponicznych opartych na IoT, podkreślająca wzajemne połączenia między różnymi komponentami, w tym czujnikami, mikrokontrolerami, serwerami danych i urządzeniami końcowymi użytkownika do monitorowania w czasie rzeczywistym i automatycznego zarządzania składnikami odżywczymi [Reza i in. 2025 na podstawie Dutta i in. 2023 – licencja Creative Commons Attribution (CC BY; <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

- ❖ Do głównych wyzwań w wykrywaniu składników odżywczych w glebie za pomocą czujników IoT należy zwiększenie dokładności generowanych przez nie odczytów i poprawa niezawodności transmisji danych. Czujniki stosowane do analizy składników odżywczych gleby są bardzo wrażliwe na czynniki takie jak wilgotność gleby, temperatura i tekstura. Zmienność tych czynników środowiskowych może prowadzić do niespójności danych, co może wpływać na precyzję zaleceń dotyczących składników odżywczych. Na przykład czujniki rozmieszczone w glebach o wysokiej zawartości gliny mogą być podatne na tłumienie przekazywanego sygnału [Reza i in. 2025], podczas gdy czujniki osadzone na w glebach piaszczystych mogą sygnalizować niedokładne pomiaru w związku z ich słabą przyczepnością do gleby [Bulacio Fischer i in. 2025].
- ❖ Wahania poziomu wilgotności mogą powodować szybkie zmiany w dostępności składników odżywczych, komplikując interpretację danych z czujników i wymagając częstej ponownej kalibracji systemów pomiarowych [Reza i in. 2025].
- ❖ Koszty i dostępność są barierami przy wdrażaniu systemów wykrywania składników odżywczych w glebie, zwłaszcza dla małych gospodarstw. Zaawansowane czujniki i powiązane technologie mogą być zbyt drogie, co ogranicza ich powszechne zastosowanie. Ponadto koszty związane z przetwarzaniem danych, konserwacją i regularną kalibracją czujników mogą stanowić dodatkowe obciążenie finansowe dla rolników. Obniżenie kosztów tych technologii poprzez innowacje, dotacje lub zwiększenie skali produkcji ma kluczowe znaczenie dla zwiększenia dostępności rolnictwa precyzyjnego dla szerszego spektrum gospodarstw rolnych [Reza i in. 2025].

Literatura:

- Reza M.N., Lee K.-H., Karim M.R., Haque M.A., Bicamumakuba E., Dey P.K. Jang Y.Y. Chung, S.-O. 2025. Trends of Soil and Solution Nutrient Sensing for Open Field and Hydroponic Cultivation in Facilitated Smart Agriculture. *Sensors* 25, 453. <https://doi.org/10.3390/s25020453>
- Bulacio Fiscar P.T., Carella A., Massenti, R., Fadhilah R., Lo Bianco, R. 2025. Advances in Monitoring Crop and Soil Nutrient Status: Proximal and Remote Sensing Techniques. *Horticulturae*, 11, 182. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020182>

- ❖ Internet Rzeczy odgrywa współcześnie kluczową rolę w rozwoju tak zwanego „inteligentnego rolnictwa”, czyli przejścia w stronę zautomatyzowanych systemów operacyjnych.
- ❖ Internet Rzeczy dzięki wykorzystaniu połączonych czujników i urządzeń umożliwia gromadzenie i analizę danych w czasie rzeczywistym, co pozwala na precyzyjne monitorowanie takich czynników, jak wilgotność gleby i zawartość w niej składników odżywczych. Pozwala to na optymalizację wykorzystania zasobów, takich jak woda i nawozy, zmniejszenie odpadów (zanieczyszczeń), zwiększenie plonów i poprawę ogólnej efektywności produkcji polowej.
- ❖ Trendy w zakresie wykrywania poziomu wilgotności gleby i składników odżywczych z wykorzystaniem IoT zmierzają w kierunku opracowania tanich, łatwych w użyciu, rozmieszczanych w terenie czujników, dostarczających wystarczająco dokładnych danych do precyzyjnego zarządzania glebą i uprawami, w celu lepszego wykorzystania wody i nawozów w produkcji roślinnej, a przez to zwiększenia jej opłacalności i zarazem zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko [Kashyap, Kumar 2021].



**INSTYTUT
TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY**

Dziękuję za uwagę!